植物生态学报 2024, **48** (9): 1128-1142 DOI: 10.17521/cjpe.2023.0219
Chinese Journal of Plant Ecology http://www.plant-ecology.com

晋西黄土区2种典型森林树种夜间液流特征及对环境因子的响应

付照琦 胡 旭 田沁瑞 葛艳灵 周红娟 吴小云 陈立欣*

北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 山西吉县 042200

摘 要 了解晋西黄土区典型森林树种夜间水分利用对准确评价流域水循环和碳循环至关重要。但目前对于晋西黄土区典型森林树种夜间液流的变化特征及对夜间环境因子的响应尚不明晰。为了探究该地区典型树种的夜间液流分配特征及对环境因子的响应, 于2021年6–10月, 采用热扩散探针(TDP)对山西省吉县蔡家川小流域刺槐(*Robinia pseudoacacia*)人工林和蒙古栎(*Quercus mongolica*)天然林中树木树干液流、土壤水分和小气候进行连续监测, 利用时间序列模型(ARMAX model)区分夜间液流中夜间蒸腾(Tn)和茎干补水(Re)。利用机器学习模型XGboost和SHAP解释框架分析夜间液流量($Q_{Nighttime}$)与夜间环境因子的关系。结果表明: 生长季刺槐和蒙古栎夜间蒸腾量占比(Tn/$Q_{Nighttime}$)分别为73.97%和30.12%, 茎干补水占比(Re/$Q_{Nighttime}$)分别为26.03%和69.88%。机器学习XGboost模型结果表明夜间饱和水汽压差(VPD)和夜间土壤水分含量(SWC)是分别影响刺槐和蒙古栎夜间液流的主导因子。VPD、夜间气温(T_a)、夜间相对湿度(RH)和整日液流量(Q_{Daily})分别达到0.30 kPa、19.84 ℃、85.3%和339.11 kg·h^{-1}后对刺槐夜间液流起促进作用。VPD达到1.5 kPa后对蒙古栎夜间液流起抑制作用, T_a和夜间风速(WS)分别达到23.11 ℃和0.58 m·s^{-1}后促进蒙古栎夜间液流。SWC对刺槐和蒙古栎夜间液流的影响具有一致性, 即SWC在0–12.9%范围内会促进夜间液流。因此构建夜间液流模型时应考虑环境因子的影响。刺槐夜间液流主要用于夜间蒸腾作用, 而蒙古栎夜间液流主要用于茎干补水。夜间VPD和SWC分别是影响刺槐和蒙古栎夜间液流的主导因子。该研究揭示了晋西黄土区2种典型树种夜间液流分配特征及与环境因子的响应, 这对于准确理解气候变化下黄土区典型森林树种的稳定性具有重要意义。

关键词 夜间液流; 环境因子; 夜间蒸腾; 黄土地区; 机器学习模型

付照琦, 胡旭, 田沁瑞, 葛艳灵, 周红娟, 吴小云, 陈立欣 (2024). 晋西黄土区2种典型森林树种夜间液流特征及对环境因子的响应. 植物生态学报, 48, 1128-1142. DOI: 10.17521/cjpe.2023.0219

Nocturnal sap flow characteristics of two typical forest tree species and responses to environmental factors in the loess region of West Shanxi, China

FU Zhao-Qi, HU Xu, TIAN Qin-Rui, GE Yan-Ling, ZHOU Hong-Juan, WU Xiao-Yun, and CHEN Li-Xin*

College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; and National Station for Forest Ecosystem Research in Jixian County, Jixian, Shanxi 042200, China

Abstract

Aims Understanding the nighttime water use of typical forest tree species in the west Loess Plateau is crucial for accurately evaluating the watershed-scale water and carbon cycles. However, the nighttime sap flow dynamics and its response to environmental factors are currently unclear for typical forest species in the west Loess Plateau.

Methods We monitored the sap flow with thermal dissipation probes (TDP) and concurrent environmental factors of *Robinia pseudoacacia* plantation and *Quercus mongolica* natural forest in the Caijiachuan watershed from June to September 2021. The time series model (ARMAX model) was used to distinguish between nighttime transpiration (Tn) and stem water replenishment (Re) in nocturnal sap flow ($Q_{Nighttime}$). We used the machine learning model XGboost and Shapley additive interpretation framework to analyze and explain the relationship between $Q_{Nighttime}$ and nighttime environmental factors.

Important findings The proportion of nighttime transpiration (Tn/$Q_{Nighttime}$) was 73.97% and 30.12% for the *R. pseudoacacia* and the *Q. mongolica*, respectively, during the growing season. The proportion of stem water filling (Re/$Q_{Nighttime}$) was 26.03% and 69.88% for the two species, respectively. The XGboost model showed that nighttime vapor pressure deficit (VPD) and nighttime soil water content (SWC) were the main factors driving

收稿日期Received: 2023-08-01 接受日期Accepted: 2024-01-16
基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF1302501)。Supported by the National Key R&D Program of China (2022YFF1302501).
* 通信作者Corresponding author (myclover17@126.com)

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

$Q_{Nighttime}$ in *R. pseudoacacia* and *Q. mongolica*, respectively. VPD, nighttime air temperature (T_a), nighttime relative humidity (RH), and daily sap flow (Q_{Daily}) can promote the $Q_{Nighttime}$ when they reach 0.30 kPa, 19.84 °C, 85.3%, and 339.11 kg·h^{-1}. For *Q. mongolica*, VPD inhibited $Q_{Nighttime}$ when it reached 1.5 kPa, while T_a and nighttime wind speed (WS) promoted $Q_{Nighttime}$ when it reached 23.11 ℃ and 0.58 m·s^{-1}, respectively. The effects of SWC on $Q_{Nighttime}$ in *R. pseudoacacia* and *Q. mongolica* were similar. The SWC within 0–12.9% range would promote the occurrence of $Q_{Nighttime}$. Therefore, our study highlights the importance of considering the magnitude of all environmental factors in establishing the nocturnal sap flow model. This study revealed the characteristics of $Q_{Nighttime}$ composition and their responses to environmental factors of two typical tree species in the west Loess Plateau. Our findings are of great significance for accurately understanding the stability of typical forest tree species in the loess region under climate change.

Key words nocturnal sap flow; environmental factor; nocturnal transpiration; the loess area; machine learning model

Fu ZQ, Hu X, Tian QR, Ge YL, Zhou HJ, Wu XY, Chen LX (2024). Nocturnal sap flow characteristics of two typical forest tree species and responses to environmental factors in the loess region of West Shanxi, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 48, 1128-1142. DOI: 10.17521/cjpe.2023.0219

研究表明, 许多树种和森林生态系统中都可以观察到夜间液流($Q_{Nighttime}$) (Di et al., 2019; Zhao et al., 2019; Chen et al., 2020; 尤海舟等, 2023)。随着极端气候的增多, 陆地生态系统夜间比白天变暖得更快(Peng et al., 2013)。夜间气温升高导致夜间饱和水汽压差(VPD)的增加, VPD是大气中的实际水汽含量与饱和水汽含量的差值, 研究表明许多树种的气孔在夜间开放或至少部分开放(Caird et al., 2007)。气孔的开放为夜间蒸腾提供了必要条件, VPD的变化改变了大气与叶片之间的水势梯度差, 进而影响夜间蒸腾, 导致植物夜间需水量的变化(Siddiq & Cao, 2018; Hayat et al., 2021)。

夜间液流对植物生长发育具有重要意义。夜间液流主要涉及两个组分: 夜间蒸腾(Tn)和茎干补水(Re) (Phillips et al., 2010; Zeppel et al., 2012)。Tn能够防止高叶片渗透势过度膨胀, 促进蒸腾作用和光合作用对养分的吸收(McDonald et al., 2002; Daley & Phillips, 2006), 而Re有助于减少植物木质部栓塞和气穴形成, 避免植物因干旱而发生水力衰竭死亡(Di et al., 2022)。但目前很难从夜间液流中准确区分出Tn和Re两部分。树干液流监测与一般的独立监测不同, 木质部液流通量是在一系列特定时期或间隔内进行连续监测的, 这种时间序列数据常呈现自相关特征(Ord, 1996; Mastrangelo, 2012), 这使许多统计分析方法无效。而时间序列模型(ARMAX)具有研究自相关问题的独特优势, 已在生态学的应用中越来越广泛(Ford et al., 2005; Zhao et al., 2016)。ARMAX模型不仅可以预测与数据采集器同步的时段, 还可以结合多种外生变量, 克服夜间液流对单一因素的依赖(Zhao et al., 2022)。本研究利用ARMAX模型来量化夜间液流量中Tn和Re两部分。许多研究表明Tn主要由VPD (Zhao et al., 2019; 赵飞飞等, 2020)、风速(WS) (Karpul & West, 2016)、土壤水分含量(SWC) (Hayat et al., 2021)导致。因此, 本研究建立$Q_{Nighttime}$与这3个环境影响因子的拟合关系。利用纳什效率系数(NSE)和观测值标准偏差比(RSR)评价模型的性能, NSE高于0.5和RSR低于0.7证明夜间液流与环境因子关系拟合较好, 则认为该时段发生夜间蒸腾, NSE低于0.5和RSR高于0.7表明两者拟合关系较差, 则认为该时段发生茎干补水(Zhao et al., 2022)。

夜间VPD (Zhao et al., 2019; 赵飞飞等, 2020; 刘雅莉等, 2022)、WS (Karpul & West, 2016)、SWC等(Hayat et al., 2021)是影响夜间液流量的3个主要环境因子, 不同环境因子之间相互制约、相互影响。如Chen等(2020)提出VPD对幼龄林分夜间液流量的影响与SWC有关, 并且WS通过增强幼龄林分的VPD从而间接地控制夜间液流量。尤海舟等(2023)研究发现WS对夜间液流量具有直接和间接效应。Hayat等(2021)发现当气温(T_a) < 17 ℃ , VPD < 1 kPa时, 夜间液流速率与T_a、VPD呈正相关关系, 而超出这些值时, 夜间液流速率保持不变或与之呈负相关关系。目前对树干液流密度与环境因素的模拟多采用单变量分析、多元线性回归或经验方程(Wang et al., 2012; 邓炜展等, 2022; Su et al., 2022; 范云翔等, 2023)。这些方法通常假设树干液流密度与环境因素之间存在连续的线性关系, 未考虑不同因素之间的非线性关系, 如VPD和T_a与夜间液流量存在指数关

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

系(Zhao et al., 2019)或对数关系(Yu et al., 2016)。SWC与夜间液流量存在二次函数关系(Liu et al., 2023), WS与夜间液流量存在对数关系(Wu et al., 2020)。同时, 传统的统计方法往往强调小数据集的置信度, 缺乏准确性和泛化能力, 过度简化现实的复杂程度, 降低了传统线性模型在机制解释方面的可靠性。随着机器学习的快速发展及其在解决非线性复杂问题上的独特优势, 多种机器学习如人工神经网络、随机森林、支持向量机开始应用于蒸发和蒸腾量的估算和模拟(Suárez et al., 2021; 赵文利等, 2021; Li et al., 2022; 牛曼丽等, 2022; 张延文等, 2022)。机器学习模型能够模拟非线性特征关系, 从而最大限度地挖掘目标信息, 获得比传统统计建模方法更好的建模性能。同时, 机器学习模型还可以量化不同影响因素间的重要性, 直观分析目标变量与影响因素的依赖关系, 具有较高的可解释性。因此, 机器学习是解决理论基础尚未完全理解问题的最佳选择, 适用于分析机理更复杂、受多种因素干扰的夜间液流活动。

晋西黄土区人工林树种与天然林树种的生态水文效应及其对当地环境的适应性是主要研究问题之一, 近几十年来, 人工林树种造林和天然林保护已成为黄土区生态恢复的主要手段。但人工林树种与天然林树种的夜间水分利用状况尚不清晰。研究表明, 刺槐(*Robinia pseudoacacia*)比相同立地条件下的山杏(*Armeniaca sibirica*)和蒙古栎(*Quercus mongolica*)的需水量更大(Yan et al., 2010), 气孔对环境的响应较慢, 保持气孔开放, 能够维持较高的蒸腾速率(Du et al., 2011), 导致刺槐人工林土壤干燥, 生长退化。而蒙古栎天然林作为黄土高原主要的乡土树种, 对干旱胁迫有一定的适应性, 对水分的利用较为保守, 林分耗水量基本稳定(王海珍等, 2003; Yan et al., 2016)。在生态适应性、提供多种服务和可持续性等方面明显优于人工林(Yan et al., 2016)。基于此, 研究晋西黄土区两树种夜间液流活动对评估林分的稳定性和当地水资源承载力具有十分重要的现实意义。

因此, 本研究以山西省吉县蔡家川小流域为研究区, 在2021年6–10月生长季连续监测刺槐和蒙古栎的树干液流密度, 并同步监测实验地的气象因子、土壤水分及降雨动态, 旨在探讨: 1)刺槐和蒙古栎的夜间液流变化特征; 2)不同林分Tn与Re的分配特征; 3)不同林分夜间液流对环境因子的响应机制。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区为晋西黄土残塬区山西省吉县蔡家川流域 (35.88°–36.35° N, 110.45°–111.12° E), 海拔904–1 592 m, 属暖温带大陆性季风气候, 该地区长期(1956–2021年)年平均气温为10.2 ℃, 年降水量579 mm, 降水分布不均, 降水多集中在6–10月, 年平均蒸发量1 724 mm, 研究区土壤为褐土, 黄土母质。乔木树种主要有刺槐、蒙古栎、侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinus tabuliformis*)和山杨(*Populus davidiana*)等。灌木主要包括: 黄刺玫(*Rosa xanthina*)、杠柳(*Periploca sepium*)、黄栌(*Cotinus coggygria*)等。

1.2 实验设计

1.2.1 样地及标准木的选取

研究样地为刺槐人工纯林和蒙古栎天然纯林, 样地大小设置为20 m × 20 m。刺槐人工林林分密度为1 100株·hm^{-2}, 林龄为34 a, 平均树高为(12.96 ± 1.43) m, 林分胸径范围8–27 cm, 平均胸径为(16.97 ± 4.42) cm, 林下灌木稀少, 主要是黄刺玫, 草本植物主要有艾(*Artemisia argyi*)、茜草(*Rubia cordifolia*)等。

蒙古栎天然林林分密度为1 070株·hm^{-2}, 林龄为41 a, 平均树高为(9.83 ± 0.49) m, 林分胸径范围6–23 cm, 平均胸径为(13.20 ± 3.25) cm, 林下灌木有黄栌、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、黄刺玫等, 草本植物主要有茅莓(*Rubus parvifolius*)、忍冬(*Lonicera japonica*)等。

按照每个样地内径阶分布频率(图1), 分别在各径阶内选择一株树干笔直、长势良好, 无病虫害的刺槐标准木6株, 蒙古栎标准木5株(表1)。

1.2.2 树干液流的测定及整树和林分蒸腾量的测定

树干液流测定采用Granier热扩散探针(TDP10, Dynamax, Texas, USA)。将探针安装在树干胸高(1.3 m)处, 在探针与树干接触的部位缠一圈橡皮泥阻隔雨水, 减少降雨对测量的影响, 用铝箔包住树干外部, 减少太阳辐射以及环境温度的影响。探针与CR1000数据采集器(Campbell Scientific, Logan, USA)相连, 记录数据为15 min的平均值, 每10天下载一次数据。数据采集器外接12 V的电池, 保证其

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

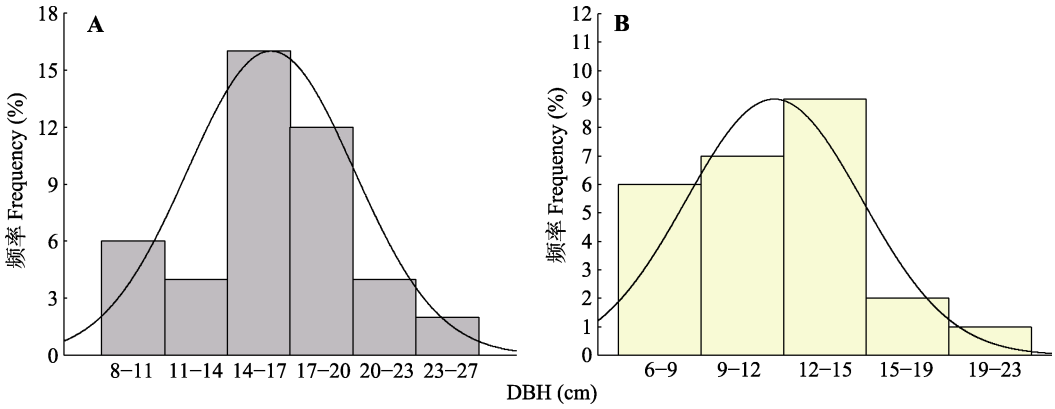


图1 晋西黄土区刺槐人工林(**A**)和蒙古栎天然林(**B**)林分胸径(DBH)分布频率。
Fig. 1 Diameter at breast height (DBH) distribution frequency of *Robinia pseudoacacia* plantation (**A**) and *Quercus mongolica* natural forest (**B**) in the loess region of West Shanxi.

表1 晋西黄土区刺槐及蒙古栎样树统计表
Table 1 Statistical table of sample trees of *Robinia pseudoacacia* and *Quercus mongolica* in the loess region of West Shanxi, China

树种 Species	编号 No. of sample trees	胸径 Diameter at breast height (cm)	树高 Tree height (m)	冠幅面积 Crown area (m^2)	边材面积 Sapwood area (cm^2)
刺槐 *R. pseudoacacia*	R1	23.0	14.5	5.0	197.1
	R2	25.0	14.5	17.5	226.5
	R3	12.0	10.0	2.0	66.4
	R4	18.7	13.5	14.0	139.4
	R5	8.5	10.5	0.6	37.3
	R6	15.3	13.0	4.0	99.7
蒙古栎 *Q. mongolica*	Q1	18.0	10.8	14.0	99.4
	Q2	13.0	10.5	8.7	55.3
	Q3	6.9	8.5	3.0	17.6
	Q4	19.2	10.1	5.0	111.6
	Q5	9.0	9.5	2.5	28.5

持续稳定的供电。液流速率的计算根据Granier (1987)建立的热扩散探针(TDP)上下探针的温度差与树干液流密度密切相关的原理, 计算公式如下:

$$J = 0.0119 \times \left(\frac{\Delta T_{\mathrm{m}} - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \quad (1)$$

式中, J为单株液流速率($\mathrm{g \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}}$), ΔT_{m}为上下探针之间的昼夜最大温差值(℃), ΔT为瞬时温差(℃)。本研究通过边材面积, 计算单株液流量, 并将其扩展到林分尺度。单株液流量(Q_{tree}, $\mathrm{kg \cdot d^{-1}}$)公式如下:

$$Q_{\mathrm{tree}} = \frac{\sum_{j=1}^{96} J_j \times A_{\mathrm{s}} \times 900}{1000} \quad (2)$$

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{96} J_{ij} \times A_{si} \times 900}{1000 \times A_{\mathrm{ground}}} \quad (3)$$

式中, J_{ij}表示第i个径阶的液流样木在一天内第j个液流密度值, A_{s}为边材总面积, A_{si}为第i个径阶的边材总面积, 液流数据每15 min记录一个, 一天内共有96个值。n为样地中样木总数, i为第i个径阶的样木, A_{ground}为样地面积, 1 000为g与kg的换算系数, 900为时间转换系数。

1.2.3 环境因子和土壤含水量测定

所有气象数据均通过距离样地1 km的吉县水土保持监测站点气象站(AWS, Campbell, Logan, USA)自动观测获得, 同步监测太阳总辐射(Rn, $\mathrm{W \cdot m^{-2}}$)、降雨量(P, mm)、T_{a} (℃)、相对湿度(RH, %)、WS ($\mathrm{m \cdot s^{-1}}$)等指标。夜间VPD (kPa)可以采用夜间T_{a}和RH进行计算, 计算公式如下:

$$\mathrm{VPD} = 0.611 \mathrm{e}^{\frac{17.502T}{T+240.97}} (1 - \mathrm{RH}) \quad (4)$$

在样地20、40、60、80和120 cm土壤深度分别安装土壤水分传感器(Decagon Devices, Pullman, USA)监测SWC (%)。外接CR1000数据采集器, 数据

DOI: 10.17521/cjpe.2023.0219

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

每15 min记录一次。两个样地的不同土层间土壤含水量无明显的季节性差异(图2), 因此, 本研究中使用的SWC取地块中0–120 cm深度的平均值。

1.3 夜间液流的划分

本研究建立$Q_{Nighttime}$与VPD、WS、SWC这3个环境影响因子的拟合关系。一般的ARMAX(p, q, r)模型采用以下形式。

$$y_t = \sum_{i=1}^{p}\varphi_j y_{t-1} + \sum_{i=1}^{q}\theta_j\epsilon_{t-1} + \sum_{i=1}^{r}\delta_j x_{t-1} + \epsilon_t \quad (5)$$

式中, x_t是K维的外生变量, $\delta_1 \ldots \delta_r$是它的系数。y_t代表夜间液流量, x_t代表的是风速WS_t、土壤含水量SWC_t、饱和水汽压差VPD_t, p和q分别是p阶自回归项(AR (p))和q阶移动平均项(MA (p))参数。$\varphi_1 \ldots \varphi_p$和$\theta_1 \ldots \theta_q$分别是AR ($p$)和MA ($p$)的系数。$\epsilon_t$是白噪声干扰。利用NSE和RSR两个模型指标来量化夜间蒸腾及茎干补水, 被分为以下4个等级, 等级I和II (0.75 < NSE ≤ 1 和 0 ≤ RSR ≤ 0.5; 0.5 < NSE ≤ 0.75和0.5 < RSR ≤ 0.7)表示为夜间液流与环境关系拟合的较好被视为夜间蒸腾作用, 等级III (0 < NSE ≤ 0.5 和 0.7 < RSR < 1)和IV (NSE = 0 和 RSR = 1)被认为与环境拟合关系较差被视为茎干补水(Zhao et al., 2022)。所有的统计分析均在R 19软件中完成。

NSE和RSR的表达式如下:

$$\mathrm{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

$$\mathrm{RSR} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}} \quad (7)$$

式中, O_i和P_i分别是第i个观测值和预测值, $\bar{O}$是观测值的平均值。

1.4 数据分析

将太阳总辐射小于5 W·m^{-2}的时段定义为夜间(Daley & Phillips, 2006), 本研究将夜间范围定义为20:00–6:00, 白天时间范围为6:00–20:00。使用Excel 2019将所有环境因子按逐小时形式进行整理。筛选出夜间环境变量。利用配对t检验或单因素方差分析(ANOVA)检验日间与夜间环境变量、土壤含水量、林分蒸腾量是否有显著差异。考虑到下雨天的液流数据存在噪声, 所有的液流统计分析均在非下雨天进行。

利用机器学习算法XGboost集成学习Chen和Guestrin (2016)、Lundberg和Lee (2017)提出的SHAP加性解释分析环境因子对夜间液流的影响。XGboost是一种集成学习算法, 集成学习算法是指多个弱学习器同时进行学习任务, 最后进行归纳总结, 从而改善模型的预测能力。深入挖掘模型预测的内部机制有助于深入理解所研究的问题。因此, 本研究引入SHAP解释框架(Lundberg & Lee, 2017)来解释匹配模型, 框架中的SHAP值用于评估影响因子对目标变量的边际贡献, 即得到各个影响因子的贡献度, 以增强模型的解释力。SHAP法的计算公式如下:

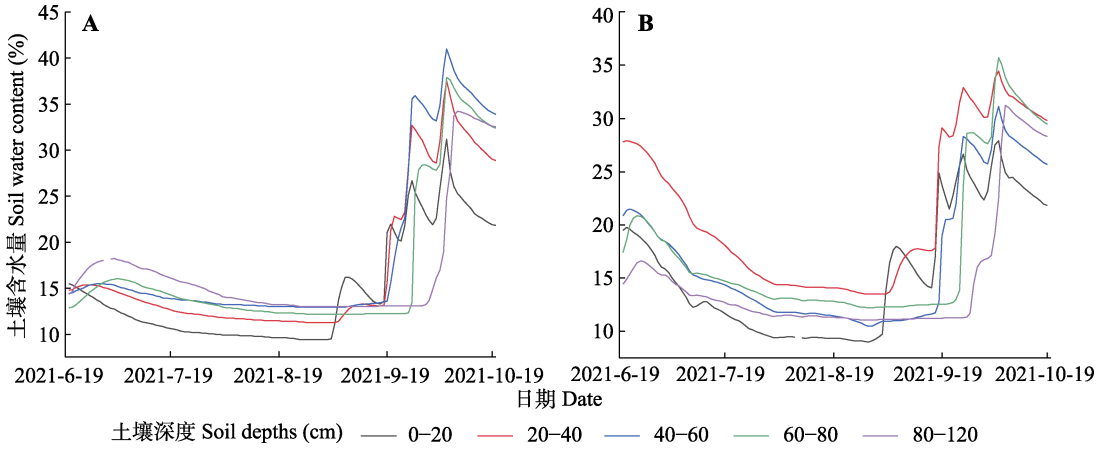


图2 晋西黄土区刺槐人工林(**A**)及蒙古栎天然林(**B**)林分不同土层深度土壤含水量变化。

Fig. 2 Changes of soil water content at different soil depths of *Robinia pseudoacacia* plantation (**A**) and *Quercus mongolica* natural forest (**B**) in the loess region of West Shanxi.

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

$$g(z') = \varnothing_0 + \sum_{i=1}^{M} \varnothing_i z_i' \quad (8)$$

式中, g为解释模型, $z' \in \{0,1\}^M$表示对应的特征值为“present” ($z' = 1$)或“absent” ($z' = 0$), $\varnothing_0$为模型在训练数据集下的期望值, M为输入特征个数, $\varnothing_i$为特征属性值, 即SHAP值, 计算公式如下:

$$\varnothing_i = \sum_{S \subseteq N\{i\}} \frac{|S|!(n-|S|-1)!}{n!}[f(S \cup \{i\}) - f(S)] \quad (9)$$

式中, $\varnothing_i$表示第i个特征的重要性, N表示变量集, S表示给定预测特征的子集, $f(S \cup \{i\})$和$f(S)$分别是有或没有第i个特征的模型结果。

建立机器学习模型与环境因子的关系主要分为4个步骤: 1)数据准备: 筛选出$Q_{Nighttime}$和环境因子(VPD、T_a、RH、WS及SWC)数据; 2)数据预处理: 包括重复值查找、缺失值填充, 对缺失的数据进行可视化后将数据随机分配为测试集(30%)和训练集(70%)最后得到标准化后的数据; 3)特征选择: 将得到的数据首先进行多重共线性分析, 在利用XGboost模型通过网格搜索调参输出最优模型; 4)解释模型: SHAP解释框架对模型结果进行全局(SHAP摘要图)和局部(特征依赖图)两个方面对模型进行解释。SHAP摘要图结合了影响因素重要性和影响因素对夜间液流的作用方式, 颜色分布代表影响因素特征值从高到低的变化。SHAP依赖图表示单个影响因素与目标变量之间的作用方式。

2 结果和分析

2.1 环境因子与土壤含水量特征

2021年观测期间日夜间气象因子变化情况如图3所示。VPD和T_a在夜间和日间呈现相似的变化规律, 日间VPD和日间T_a显著高于夜间VPD和夜间T_a (图3A、3B)。研究期间夜间平均T_a和VPD分别为(16.12 ± 4.23) ℃和(0.57 ± 0.37) kPa, 最大值均出现在夏季(7–8月), 为27.77 ℃和2.51 kPa。夜间和日间WS无显著差异(图3D)。夜间WS日均值为(0.97 ± 0.33) m·s^{-1}, 在10月达到最大值2.72 m·s^{-1} (图3D)。夜间RH高于日间。观测期间, 研究区累计降雨459.5 mm, 多集中在9月, 9月累计降雨量最大, 达到210.5 mm (图3E)。刺槐人工林和蒙古栎天然林SWC日均值分别为(16.53 ± 6.52)%和(16.59 ± 5.88)%, SWC最低值出现在8月, 分别为11.57%和10.90%。各月份土壤含水量大小顺序为10月> 9月> 6月> 7月> 8月, 随着9月降雨量的增加, 样地内土壤水分条件逐渐得到改善, 且刺槐林对降水的敏感程度更大(图3E)。

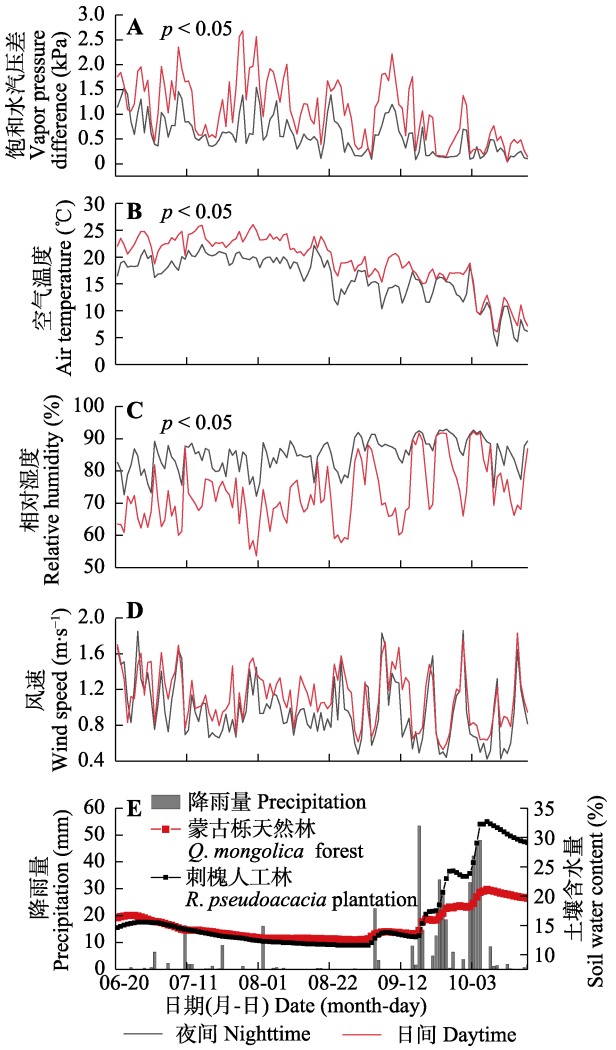


图3 晋西黄土区观测期间刺槐人工林和蒙古栎天然林日间及夜间环境因子变化特征。$p < 0.05$代表日间和夜间环境因子的差异显著。

Fig. 3 Variations of environmental factors during the observation period in the *Robinia pseudoacacia* plantation and *Quercus mongolica* forest in the loess area of West Shanxi. $p < 0.05$ represents the significant difference between daytime and nighttime environmental factors.

2.2 夜间液流变化特征及夜间液流占比

图4表明所有样木的夜间液流速率存在普遍的规律性变化, 各样木在0:00前均可以观测到明显的夜间液流, 且在0:00前液流速率下降的幅度更为明显, 之后趋于平缓, 但仍可以观测到明显的夜间液流变化, 这说明夜间液流速率的变化主要存在于前半夜, 由于白天蒸腾比较强烈导致树木水分亏缺, 日落后根系与土壤之间的水势差仍然会存在, 所以刚入夜时夜间液流速率较高以弥补白天水分亏缺, 随后树木水分亏缺程度减小, 夜间液流速率随之减

DOI: 10.17521/cjpe.2023.0219

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

小(图4B、4D)。不同树种之间夜间液流速率也存在着显著差异(表2)。

图5表明刺槐人工林与蒙古栎天然林液流量呈明显日变化特征。无论日间还是夜间刺槐人工林液流量均大于蒙古栎天然林, 生长季期间刺槐人工林和蒙古栎天然林总蒸腾耗水分别为52.15和38.88 mm·d^{-1}, 夜间液流量分为4.41和2.80 mm·d^{-1}。两个林分日间累计液流量均在生长盛期(7月)最大, 刺槐人工林夜间液流量最大值出现在生长末期为0.55 mm·d^{-1}, 而蒙古栎天然林夜间液流量最大值出现在7月为0.27 mm·d^{-1}。整个生长季期间刺槐人工林和蒙古栎天然林夜间液流占比分别为10.68%和12.75%。刺槐人工林和蒙古栎天然林夜间液流占比在生长季末期逐渐增大。

2.3 夜间液流的划分

如图6所示。ARMAX模型区分了刺槐人工林与

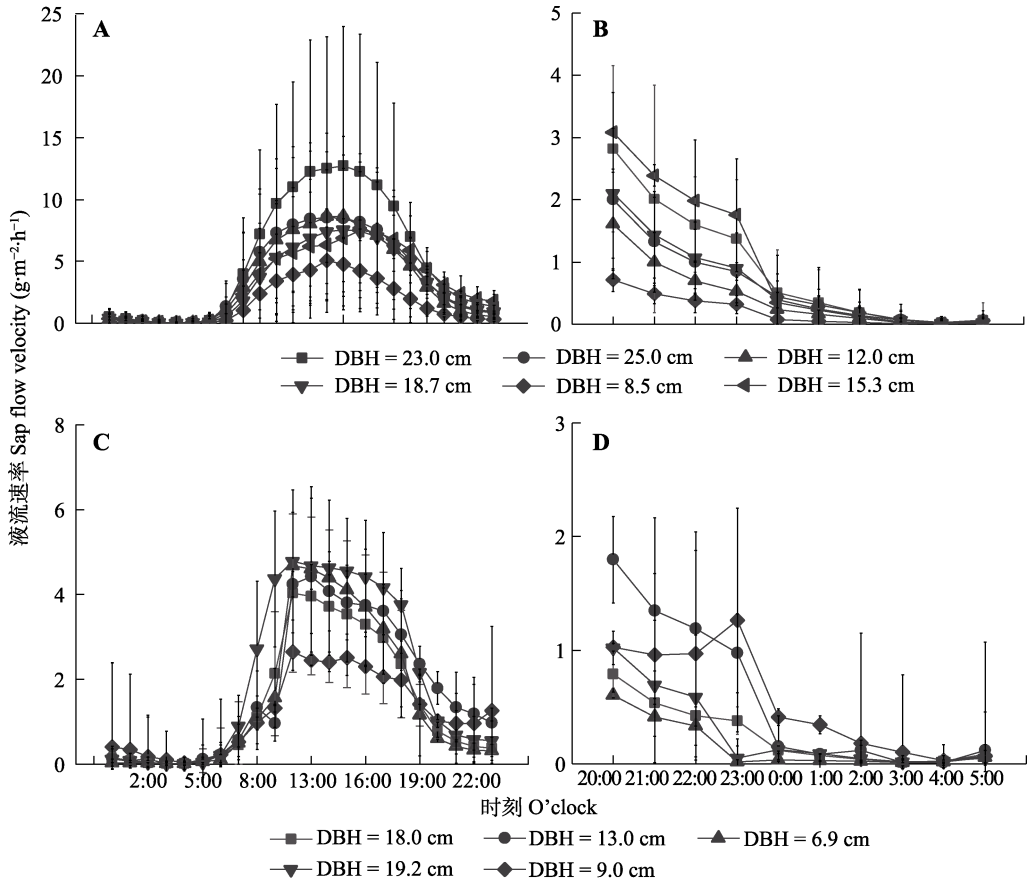


图4 晋西黄土区刺槐(**A**、**B**)和蒙古栎(**C**、**D**)不同胸径(DBH)树木树干液流速率变化(平均值±标准差)。**A**、**C**代表日间; **B**、**D**代表夜间。

Fig. 4 Sap flow rate of *Robinia pseudoacacia* (**A, B**) and *Quercus mongolica* (**C, D**) of sample trees with different diameter at breast height (DBH) in the loess area of West Shanxi (mean ± *SD*). **A, C** represent daytime; **B, D** represent nighttime.

表2 晋西黄土区不同林分液流量配对样本*t*检验结果(平均值±标准差)

Table 2 The *t*-test result of sap flux of different stand in the loess area of West Shanxi (mean ± *SD*)

林分 Stand	整日液流 Daily sap flow (mm)	日间液流 Daytime sap flow (mm)	夜间液流 Nighttime sap flow (mm)	夜间液流占比 Proportion of nighttime sap flow (%)
刺槐人工林 *Robinia pseudoacacia* plantation	0.42 ± 0.26^{a}	0.38 ± 0.23^{a}	0.03 ± 0.01^{a}	10.68 ± 1.05^{b}
蒙古栎天然林 *Quercus mongolica* forest	0.31 ± 0.25^{b}	0.29 ± 0.16^{b}	0.02 ± 0.00^{b}	12.75 ± 1.50^{a}

不同小写字母表示不同林分间存在显著差异($p < 0.05$)。

Different lowercase letters indicated significant difference between different stands ($p < 0.05$).

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

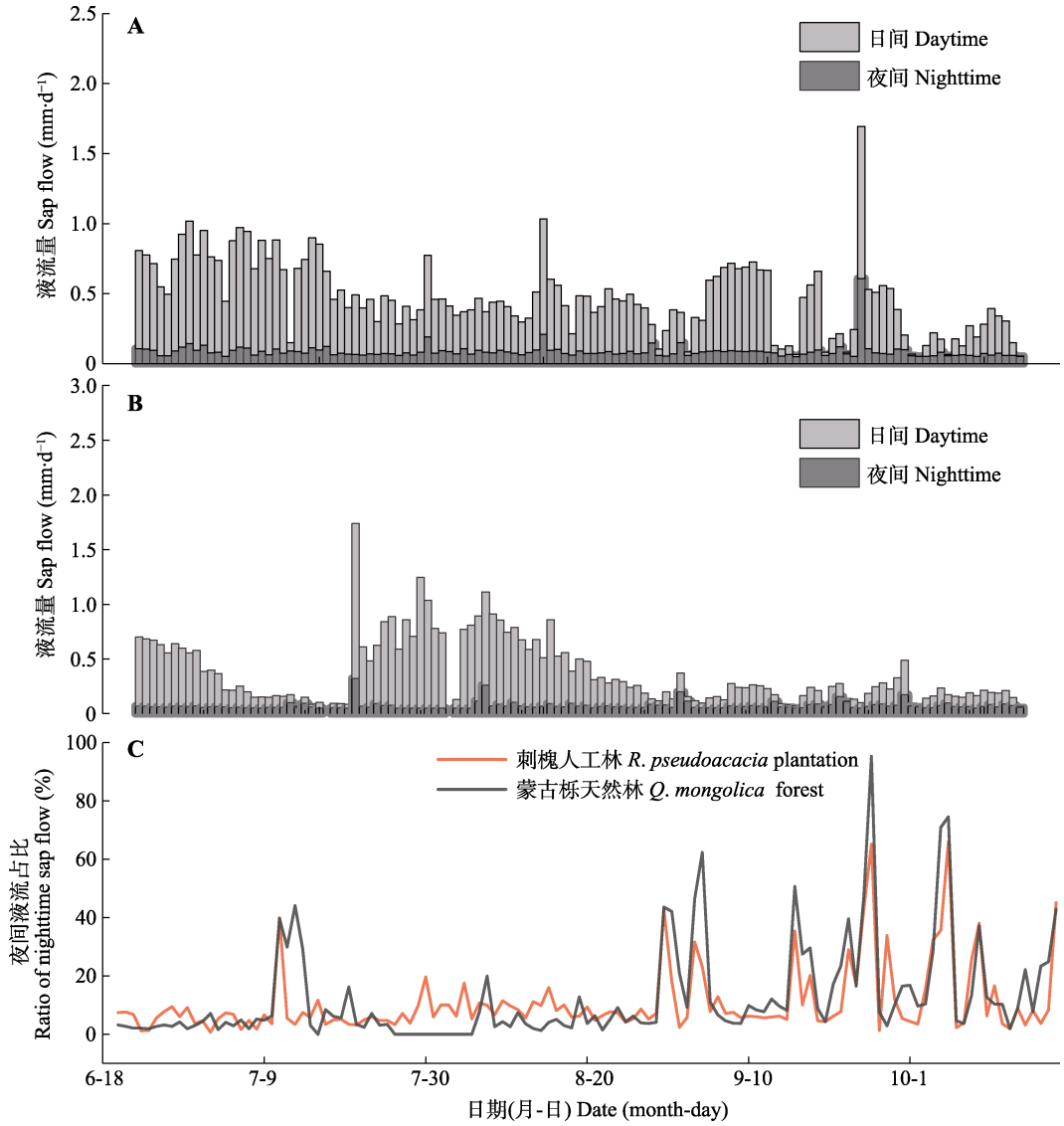


图5 晋西黄土区刺槐人工林(**A**)和蒙古栎天然林(**B**)林分液流量及各林分夜间液流占比(**C**)日变化。
Fig. 5 Daily variations of stand sap flow for *Robinia pseudoacacia* plantation (**A**) and *Quercus mongolica* forest (**B**) and proportions of nocturnal sap flow to total daily sap flow (**C**) in the loess area of West Shanxi.

蒙古栎天然林的Tn (等级I–II)与Re (等级I–II)时刻(图6A、6B)。如图可知, 刺槐人工林夜间蒸腾时段包括20:00–23:00、3:00–6:00, 而23:00–3:00为茎干补水时段。蒙古栎天然林夜间蒸腾时段为22:00–0:00、2:00–3:00, 茎干补水为20:00–22:00、0:00–2:00和3:00–6:00。刺槐人工林各月夜间蒸腾量占比远高于茎干补水量占比(图6C)。而蒙古栎天然林各月份补水量占比较高(图6D)。整个生长季刺槐人工林与蒙古栎天然林累计夜间蒸腾量占比分别为73.97%和30.12%, 补水量占比分别为26.03%和69.88%。

2.4 夜间液流与环境因子的响应

XGboost模型随机将夜间液流数据集与气象因子和土壤水分含量的30%作为测试集, 夜间液流与气象因子和土壤水分含量的预测值和实际值进行可视化如图7所示, 气象因子和土壤水分别能够解释刺槐和蒙古栎74%和68%的夜间液流变化。刺槐人工林夜间液流与环境因子的拟合程度高于蒙古栎天然林夜间液流。

由图8A可知, 高的VPD对刺槐$Q_{Nighttime}$起正向贡献, Q_{Daily}对刺槐$Q_{Nighttime}$的影响与VPD一致。而低值RH对刺槐$Q_{Nighttime}$的正向贡献更明显。由图8B可知, 较低的SWC对蒙古栎$Q_{Nighttime}$起正向贡献。相反, 高的Q_{Daily}和T_a对蒙古栎$Q_{Nighttime}$起正向贡献。

将图中的特征重要度进行量化得到平均SHAP特征重要性(图8C、8D)。从图中可以得知, 影响刺槐和蒙古栎$Q_{Nighttime}$的主导因子有所差异。影响刺槐

DOI: 10.17521/cjpe.2023.0219

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

$Q_{Nighttime}$的主要因子分别为VPD (SHAP值为1.2)、Q_{Daily} (SHAP值为1.02)和RH (SHAP值为0.8), 本研究利用每个变量所得到的SHAP值占所有变量SHAP值总和的比例近似当做其解释能力, 其中VPD、Q_{Daily}和RH解释能力占所有目标特征的27.9%、23.7%和18.6% (图8C)。蒙古栎$Q_{Nighttime}$主导

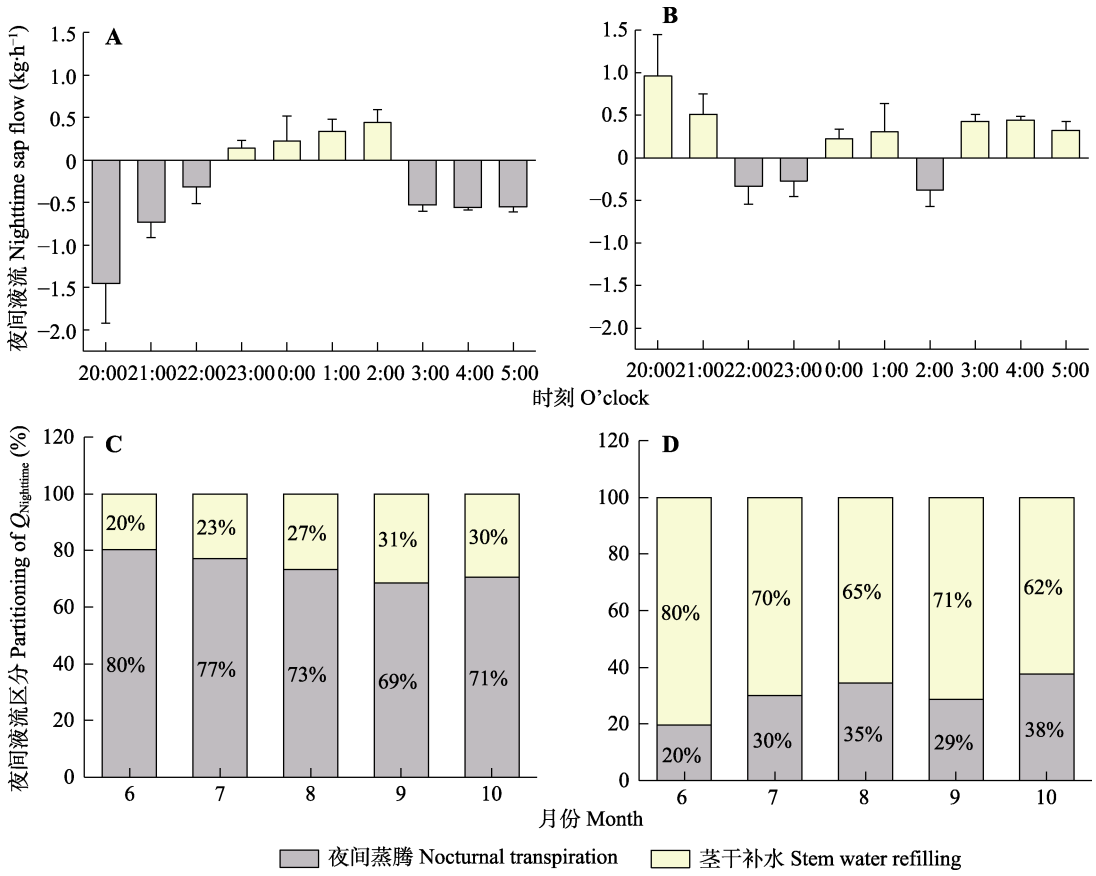


图6 晋西黄土区刺槐人工林(**A**、**C**)和蒙古栎天然林(**B**、**D**)夜间蒸腾和茎干补水的逐时分布(平均值±标准差)及夜间蒸腾与茎干补水占比。$Q_{Nighttime}$, 夜间液流。

Fig. 6 Hourly evaluation and distribution (mean ± *SD*) of nocturnal transpiration (Tn) and stem water refilling (Re) to nighttime sap flow ($Q_{Nighttime}$) in *Robinia pseudoacacia* (**A, C**) plantation and *Quercus mongolica* forest (**B, D**) and partitioning of $Q_{Nighttime}$ into Tn and Re in the loess area of West Shanxi.

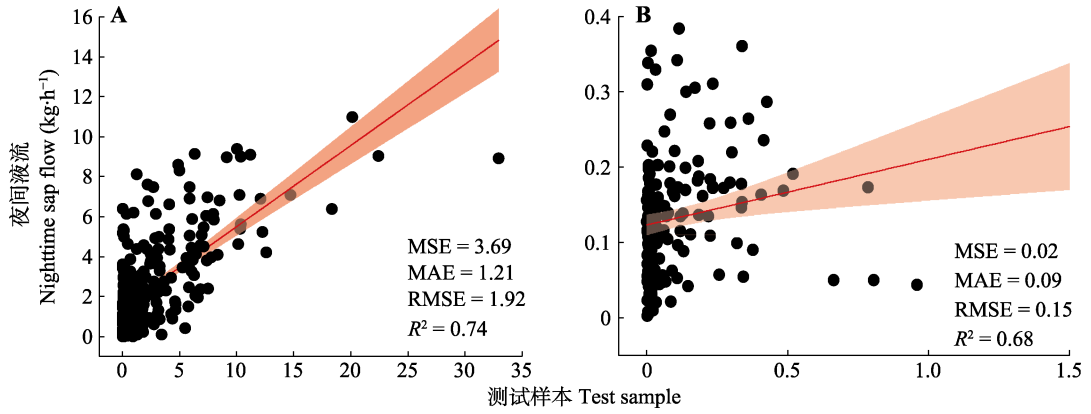


图7 基于XGboost模型的晋西黄土区刺槐人工林(**A**)和蒙古栎天然林(**B**)在测试集上液流预测值与实际值拟合曲线。MAE, 平均绝对误差; MSE, 均方误差; RMSE, 均方根误差; R^2, 决定系数。

Fig. 7 Predicted and observed nighttime sap flow curves of *Robinia pseudoacacia* plantation (**A**) and *Quercus mongolica* forest (**B**) based on the XGboost model on the test set on hourly scale in the loess area of West Shanxi. MAE, mean absolute error; MSE, mean-square error; RMSE, root mean square error; R^2, the coefficient of determination.

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

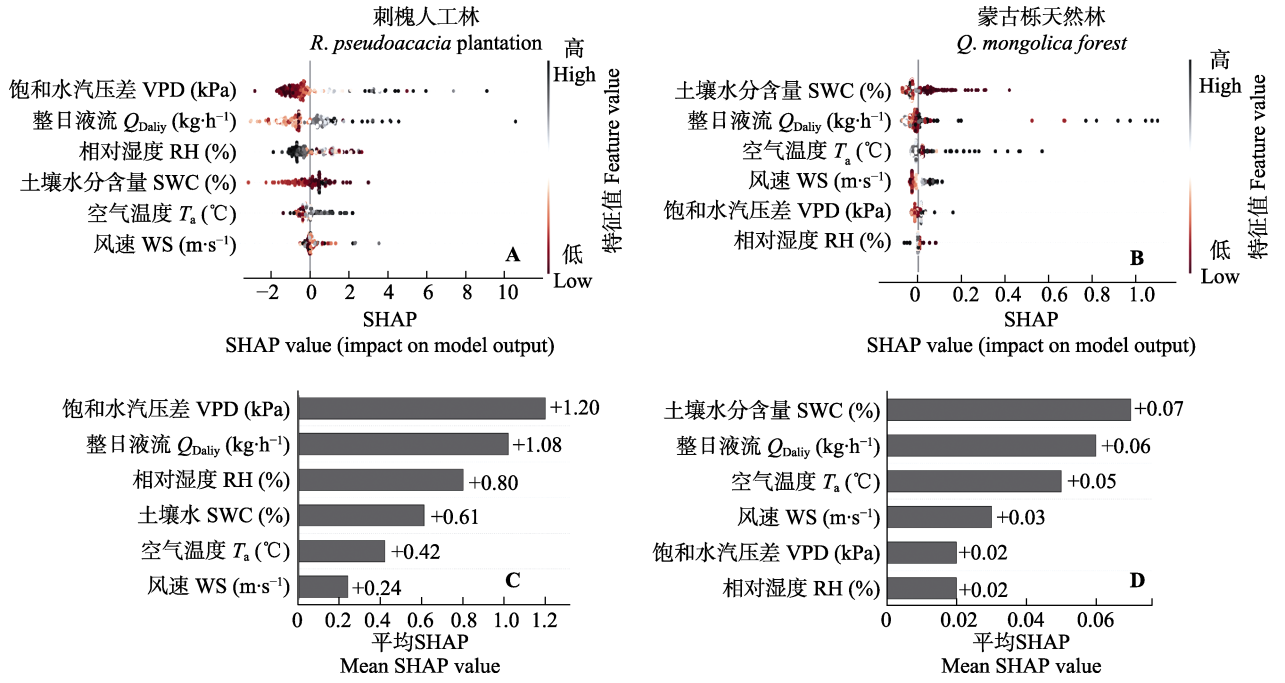


图8 晋西黄土区刺槐人工林和蒙古栎天然林SHAP摘要图(**A**、**B**)和SHAP特征重要性柱状图(**C**、**D**)。
Fig. 8 SHAP summary plot (**A, B**) and importance matrix (**C, D**) of *Robinia pseudoacacia* plantation and *Quercus mongolica* forest in the loess area of West Shanxi. Q_{Daily}, daily sap flow; RH, relative humidity; SWC, soil water content; T_a, air temperature; VPD, vapor pressure deficit; WS, wind speed.

因子分别为SWC (SHAP值为0.07)、Q_{Daily} (SHAP值为0.06)和T_a (SHAP值为0.05), 解释能力分别为28%、24%和20% (图8D)。

当VPD值达到0.30 kPa时, 逐渐对刺槐$Q_{Nighttime}$起促进作用(SHAP值为正) (图9A)。对于蒙古栎来说, 当VPD达到1.5 kPa时, 对$Q_{Nighttime}$起抑制作用(SHAP值为负) (图9K)。当T_a分别达到19.84和23.11 ℃时会促进刺槐和蒙古栎$Q_{Nighttime}$ (图9E、9I)。WS对刺槐$Q_{Nighttime}$无明显影响(图9F), 但WS达到0.58 m·s^{-1}时对蒙古栎$Q_{Nighttime}$起正向作用(图9J)。RH大于85.3%时抑制刺槐$Q_{Nighttime}$的发生。Q_{Daily}达到339.11 kg·h^{-1}促进刺槐$Q_{Nighttime}$ (图9B)。而RH和Q_{Daily}对蒙古栎$Q_{Nighttime}$无明显的促进或抑制趋势(图9H、9I)。SWC对刺槐和蒙古栎$Q_{Nighttime}$的影响相似, 当SWC小于12.9%时会促进$Q_{Nighttime}$ (图9D、9J)。

3 讨论

3.1 刺槐人工林与蒙古栎天然林夜间液流特征

树种夜间液流与树种个体和外部环境条件均有关。本研究比较了晋西黄土区刺槐人工林和蒙古栎天然林两种不同森林树种的夜间液流特征。结果表明, 无论是日间还是夜间, 刺槐人工林的蒸腾耗水量均高于蒙古栎天然林, 这与以往的研究(Du et al., 2011; Lyu et al., 2023)一致。树木本身的耗水量在很大程度上受树木自身条件的限制, 在干旱胁迫下, 有些树种气孔敏感度较高, 可以迅速关闭全部或一部分气孔来保持一定的叶水势, 减少水分消耗, 而有些树种不会立刻关闭气孔, 而是降低叶水势以维持较高的根系吸水能力和蒸腾速率(罗丹丹等, 2017)。Du等(2011)研究了黄土区刺槐和蒙古栎树干液流密度特征, 研究表明刺槐对VPD的响应较慢, 表现出较低的气孔敏感度, 对水分的需求量较大。而蒙古栎对VPD等环境因子表现出较高的气孔敏感度, 因此, 更能采取保守的水分利用策略。Lyu等(2020)也发现刺槐和蒙古栎的气孔对大气条件的敏感度不同, 蒙古栎应对VPD增加, 气孔调节较迅速, 从而减少蒸腾作用。相比之下, 刺槐能够持续进行蒸腾作用。因此, 刺槐的需水量更大。

两种林分夜间液流占比也具有树种差异, 刺槐人工林和蒙古栎天然林日均夜间液流占比为10.68%和12.75%, 两个林分均在生长末期夜间液流占比较大, 这主要是由于生长末期夜间时间较生长季盛期较长, 有更多的时间积累夜间液流。同时, 研究区7、8月累计降水量为121 mm, 两个林分土壤平

DOI: 10.17521/cjpe.2023.0219

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

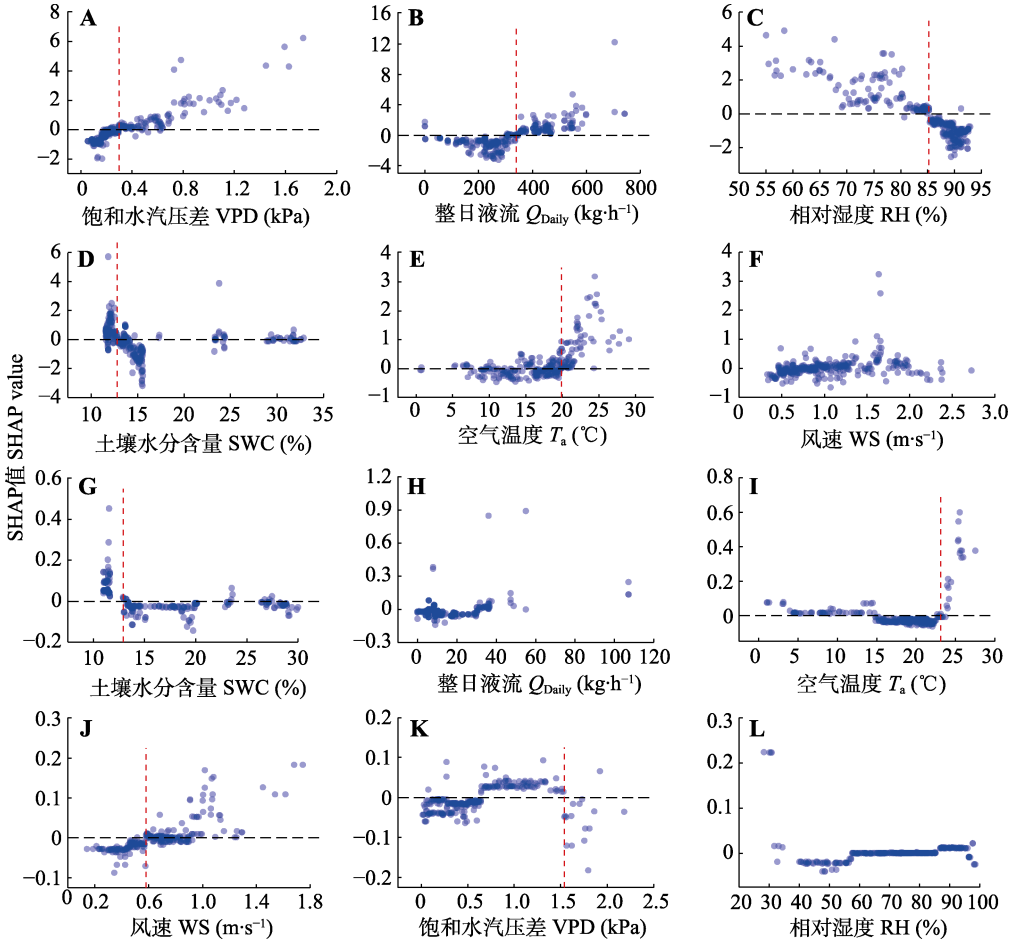


图9 晋西黄土区刺槐人工林(**A–F**)和蒙古栎天然林(**G–I**)夜间液流与环境因子的SHAP依赖图。

Fig. 9 SHAP dependence plot of nighttime sap flow and environmental factors of *Robinia pseudoacacia* plantation (**A–F**) and *Quercus mongolica* forest (**G–I**) in the loess area of West Shanxi. Q_{Daily}, daily sap flow; RH, relative humidity; SWC, soil water content; T_a, air temperature; VPD, vapor pressure deficit; WS, wind speed.

均含水量为12.88%和12.22%, 此时处于干旱胁迫时期, 而9月累计降水量为251.6 mm, 土壤平均含水量为21.31%和20.51%, 土壤水分条件良好。因此, 此时的夜间液流增大可能用于补充前期树干水分亏缺(刘云洁等, 2023)。

从夜间液流中准确识别出Re和Tn, 有助于准确量化实际树木的夜间蒸腾和补水, 能够更好地理解植物生理过程和对外界环境的响应和夜间水分的功能。本研究利用ARMAX模型量化夜间液流中的Tn和Re两部分。模型结果表明, 在整个生长季期间, 刺槐人工林和蒙古栎天然林夜间蒸腾量占比分别为73.97%和30.12%, 茎干补水量占比为26.03%和69.88%, 刺槐人工林夜间失水量高于蒙古栎天然林。已有研究发现各树种夜间补水在夜间液流中占比在14.7%–82% (Buckley et al., 2011; Wang et al., 2012; Yu et al., 2018; Di et al., 2019; 鄢春华等, 2020; 尤海舟等, 2023)。夜间饱和水汽压差、夜间风速、夜间土壤含水量及地下水对夜间液流量进行同步控制, 共同影响夜间液流量(Di et al., 2019; Wu et al., 2020; 尤海舟等, 2023)。相对于环境因子, 茎干储水量和前一天水分状况也会制约夜间液流活动(Wu et al., 2020), 树木形态特征(如树高、冠层大小、胸径)对夜间水分补给的影响更大(Wang et al., 2012, 2018)。

本研究也量化了生长季不同月份夜间液流的分配情况, 不同月份间刺槐夜间液流多用于夜间蒸腾, 而蒙古栎用于夜间补水量的占比较大(图6C、6D)。刺槐和蒙古栎均属于环孔材树种(李秧秧等, 2010a), 这种类型的树种因具有较大导管或管胞直径, 植物木质部导水率和蒸腾能力较高, 因此容易发生栓塞的风险(Tyree & Dixon, 1986)。研究结果表明人工种植的刺槐具有较低的比导水率和比叶导水率, 且对

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

木质部栓塞的抵抗能力较弱(李秧秧等, 2010a)。而蒙古栎能够将更多的干物质投入木质部结构构建中, 具有较高的木材密度, 从而提高抵抗栓塞的能力(李秧秧等, 2010b)。植物水分条件的改善和木质部水势的提高能够促进植物木质部栓塞的恢复(安锋等, 2006)。天然林树种蒙古栎通过夜间补水作用提高木质部水势, 减轻木质部栓塞, 避免树木死亡。然而, 刺槐夜间蒸腾作用持续增加, 植物体水分在夜间不能得到恢复, 可能造成该地区刺槐人工林在春季和初夏容易受到土壤干旱胁迫, 出现枯死问题的原因之一。因此, 夜间补水也可能是黄土区以蒙古栎为代表的天然林林分比刺槐人工林结构和健康更稳定的重要适应策略之一。

3.2 不同林分夜间液流对环境因子的响应

理解环境因子是如何影响夜间液流对于水资源限制地区的植物水分利用至关重要。然而, 尚不清楚环境因子是如何影响人工林和天然林的夜间水分利用情况。本研究发现, 无论日间还是夜间, 刺槐需水均高于乡土树种蒙古栎, 这与以往的研究结果(Yu et al., 2018; Lyu et al., 2023)一致。同时, 环境因子对刺槐人工林和蒙古栎天然林$Q_{Nighttime}$的贡献有所差异(图8C、8D)。VPD是影响刺槐$Q_{Nighttime}$最重要的环境因子, 这与之前的研究结果(Guo et al., 2021; Hayat et al., 2021; 张荣等, 2022)一致, 解释能力占所有特征变量的27.9% (图8C)。刺槐$Q_{Nighttime}$随着VPD值的增大而增大(图9A), 而VPD对蒙古栎$Q_{Nighttime}$的影响并不强, 解释能力仅占所有特征变量的8%。从图9K可以看出当VPD达到1.5 kPa后, 逐渐对$Q_{Nighttime}$起抑制作用。这可能是由于蒙古栎能够通过自身对气孔调节机制来维持水势和较高的生产力, 实现对水分的保守型利用(罗丹丹等, 2017), 因此可以更好地适应半干旱区的环境(Du et al., 2011; Lyu et al., 2020)。

T_a分别达到19.84和23.11 ℃时会促进刺槐和蒙古栎$Q_{Nighttime}$ (图9E、9I)。相比于VPD, 较少有研究关注T_a对夜间液流的影响。本研究区夜间气温最高能达到27.77 ℃, 因此, 夜间液流能够使叶片冷却(Fisher et al., 2007), 可被认为是一种对夜间高温的适应策略。T_a的增加也可以满足植物对养分的需求。在大气CO_2浓度升高的背景下, 夜间液流有助于补偿植物氮的耗竭(McDonald et al., 2002)。因此, T_a通过促进$Q_{Nighttime}$来补偿氮, 以支持植物的快速生长(Stuerz et al., 2020; Shen et al., 2022)。WS达到0.58 $m·s^{-1}$时逐渐对蒙古栎$Q_{Nighttime}$起正向作用(图9J), 但WS对刺槐$Q_{Nighttime}$无明显影响。风速增加可降低空气阻力, 促进气孔界面的水汽交换(Fricke, 2019), 并加速从湿润冠层向周边干燥大气的水汽输送(Kim et al., 2014), 从而增加植被蒸腾失水。这也解释了本研究观测到风速提高对蒙古栎天然林$Q_{Nighttime}$的促进作用, 夜间WS对夜间液流活动的显著影响也在油松林(Chen et al., 2020)和桉树(*Eucalyptus robusta*)林(Zeppel et al., 2010)中被观测到。然而这一现象在刺槐人工林中并未发现, 这主要是由于研究区的刺槐人工林林分密度较高, 削弱林内及冠层内风速, 降低了风速对夜间液流的促进效应。

研究结果表明, 当土壤水分相对匮缺(SWC小于12.9%)时, 对蒙古栎和刺槐$Q_{Nighttime}$起促进作用(图9D、9J), 而当SWC增高时对$Q_{Nighttime}$无明显作用。刘云洁等(2023)研究了不同土壤水分条件下臭椿的树干液流变化, 结果表明在土壤水分达到一定的阈值前, 臭椿(*Ailanthus altissima*) $Q_{Nighttime}$随着土壤水分含量的增加而增加, 而达到一定阈值后, $Q_{Nighttime}$不再增加，本研究结果与之一致。SWC降低时, $Q_{Nighttime}$增大可能是由于蒸腾拉力(张婕, 2019)或茎干补水作用(Cao et al., 2020; Chen et al., 2020)。本研究结果表明蒙古栎的夜间液流多用于夜间补水作用, SWC和Q_{Daily}是主导蒙古栎夜间液流的主要影响因子。相比之下, 当土壤水处于相对亏缺时刺槐人工林的夜间液流主要是由蒸腾拉力引起, 其主要环境影响因子为VPD和Q_{Daily}。因此, 半干旱区的刺槐和蒙古栎的夜间液流过程可能反映植物应对干旱的不同机制, 对于植被应对干旱有着重要作用。

4 结论

深入剖析半干旱区人工林和天然林树种夜间液流特征及对环境因子的响应, 有助于准确理解气候变化下黄土高原林分稳定性和林分可持续发展。研究表明刺槐和蒙古栎的夜间液流分配特征存在差异。刺槐人工林夜间液流主要用于夜间蒸腾作用, 而蒙古栎夜间液流主要用于茎干补水, 两个树种具有不同的夜间液流分配利用方式, 可能代表其不同的干旱适应策略。机器学习模型XGboost及SHAP解释框架表明主导夜间液流的环境因子有所差异,

DOI: 10.17521/cjpe.2023.0219

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

VPD、Q_{Daily}及RH是影响刺槐人工林夜间液流的重要因子, 而SWC、Q_{Daily}及T_a是蒙古栎天然林夜间液流的主要影响因子。

参考文献

An F, Cai J, Jiang ZM, Zhang YY, Lan GY, Zhang SX (2006). Refilling of embolism in the xylem of eight tree species and its relationship with pressure-volume parameters. *Journal of Northwest A & F University* (*Natural Science Edition*), 34(1), 38-44. [安锋, 蔡靖, 姜在民, 张远迎, 兰国玉, 张硕新 (2006). 八种木本植物木质部栓塞恢复特性及其与PV曲线水分参数的关系. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 34(1), 38-44.]

Buckley TN, Turnbull TL, Pfautsch S, Adams MA (2011). Nocturnal water loss in mature subalpine *Eucalyptus delegatensis* tall open forests and adjacent *E. pauciflora* woodlands. *Ecology and Evolution*, 1, 435-450.

Caird MA, Richards JH, Donovan LA (2007). Nighttime stomatal conductance and transpiration in C_3 and C_4 plants. *Plant Physiology*, 143, 4-10.

Cao QQ, Li JR, Xiao HJ, Cao YB, Xin ZM, Yang BM, Liu T, Yuan MT (2020). Sap flow of *Amorpha fruticosa*: implications of water use strategy in a semiarid system with secondary salinization. *Scientific Reports*, 10, 1-11.

Chen T, Guestrin C (2016). XGBoost: a scalable tree boosting system. [2023-08-01]. https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/2939672.2939785.

Chen Z, Zhang ZQ, Sun G, Chen LX, Xu H, Chen SN (2020). Biophysical controls on nocturnal sap flow in plantation forests in a semi-arid region of northern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 284, 107904. DOI: 10.1016/j.agrformet.2020.107904.

Daley MJ, Phillips NG (2006). Interspecific variation in nighttime transpiration and stomatal conductance in a mixed new England deciduous forest. *Tree Physiology*, 26, 411-419.

Deng WZ, Su Y, Dou ZN, Han X, Bai HR, He LL, Luo H, Wu HL (2022). Study on sap flow and its influencing factors of *Fraxinus velutina* in leaf-spreading stage. *South China Forestry Science*, 50(4), 11-16. [邓炜展, 苏雨, 窦占宁, 韩叙, 白浩荣, 贺露露, 罗欢, 吴海龙 (2022). 绒毛白蜡展叶期树干液流及其影响因子研究. 南方林业科学, 50(4), 11-16.]

Di N, Xi B, Clothier B, Wang Y, Li G, Jia L (2019). Diurnal and nocturnal transpiration behaviors and their responses to groundwater-table fluctuations and meteorological factors of *Populus tomentosa* in the North China Plain. *Forest Ecology and Management*, 448, 445-456.

Di N, Yang SJ, Liu Y, Fan YX, Duan JE, Nadezhdina N, Li XM, Xi BY (2022). Soil-moisture-dependent nocturnal water use strategy and its responses to meteorological factors in a seasonal-arid poplar plantation. *Agricultural Water Management*, 274, 107984. DOI: 10.1016/j.agwat.2022.107984.

Du S, Wang Y, Kume T, Zhang J, Otsuki K, Yamanaka N, Liu G (2011). Sapflow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 1-10.

Fan YX, Di N, Liu Y, Zhang YW, Duan J, Li X, Wang HH, Xi BY (2023). Spatiotemporal dynamics of nocturnal sap flow of *Populus tomentosa* and environmental impact factors. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 47, 262-274. [范云翔, 邸楠, 刘洋, 章毓文, 段劼, 李新, 王海红, 席本野 (2023). 毛白杨茎干夜间液流时空动态及其环境影响因子. 植物生态学报, 47, 262-274.]

Fisher JB, Baldocchi DD, Misson L, Dawson TE, Goldstein AH (2007). What the towers don't see at night: nocturnal sap flow in trees and shrubs at two AmeriFlux sites in California. *Tree Physiology*, 27, 597-610.

Ford CR, Goranson CE, Mitchell RJ, Will RE, Teskey RO (2005). Modeling canopy transpiration using time series analysis: a case study illustrating the effect of soil moisture deficit on *Pinus taeda*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 130, 163-175.

Fricke W (2019). Night-time transpiration—Favouring growth? *Trends in Plant Science*, 24, 311-317.

Granier A (1987). Evaluation of transpiration in a douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 3, 309-319.

Guo XN, Shang GF, Tian Y, Jia X, Zha TS, Li C, Yang HC, Zhang XA (2021). Dynamics of nocturnal evapotranspiration and its biophysical controls over a desert shrubland of northwest China. *Forests*, 12, 1296. DOI: 10.3390/f12101296.

Hayat M, Iqbal S, Zha T, Jia X, Qian D, Bourque CPA, Khan A, Tian Y, Bai Y, Liu P, Yang R (2021). Biophysical control on nighttime sap flow in *Salix psammophila* in a semiarid shrubland ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, 300, 108329. DOI: 10.1016/j.agrformet.2021.108329.

Karpul RH, West AG (2016). Wind drives nocturnal, but not diurnal, transpiration in *leucospermum conocarpodendron* trees: implications for stilling on the cape Peninsula. *Tree Physiology*, 36, 954-966.

Kim D, Oren R, Oishi AC, Hsieh CI, Phillips N, Novick KA, Stoy PC (2014). Sensitivity of stand transpiration to wind velocity in a mixed broadleaved deciduous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 187, 62-71.

Li YN, Ye JX, Xu DY, Zhou GM, Feng HL (2022). Prediction of sap flow with historical environmental factors based on deep learning technology. *Computers and Electronics in Agriculture*, 202, 107400. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107400.

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

Li YY, Shi H, Shao MA (2010a). Cavitation resistance of dominant trees and shrubs in Loess hilly region and their relationship with xylem structure. *Journal of Beijing Forestry University*, 32(3), 8-13. [李秧秧, 石辉, 邵明安 (2010a). 黄土丘陵区典型树木抵抗空穴化能力及与木质部结构的关系. 北京林业大学学报, 32(3), 8-13.]

Li YY, Shi H, Shao MA (2010b). Leaf water use efficiency and its relationship with hydraulic characteristics in eight dominant trees and shrubs in loess hilly area during vegetation succession. *Scientia Silvae Sinicae*, 46(2), 67-73. [李秧秧, 石辉, 邵明安 (2010b). 黄土丘陵区乔灌木叶水分利用效率及与水力学特性关系. 林业科学, 46(2), 67-73.]

Liu YJ, Zhang HH, Chang SZ, Zhou XQ, Ma CM (2023). Sap flow at night in the stems of *Ailanthus altissima* and its determinants. *Journal of Irrigation and Drainage*, 42(2), 9-15. [刘云洁, 张含含, 常胜朝, 周新启, 马长明 (2023). 臭椿夜间树干液流变化特征及环境驱动因素分析. 灌溉排水学报, 42(2), 9-15.]

Liu YL, Bai JH, Xiong W, Han YQ, Lian HL, Guo H, Xin ZM, Liu XJ, Liu HY (2022). The characteristics of branch nocturnal sap flow and its environmental driving mechanism of *Haloxylon ammodendron* artificial shrub in the Ulan Buh Desert. *Journal of Desert Research*, 42(5), 195-203. [刘雅莉, 白建华, 熊伟, 韩雨晴, 廉泓林, 郭浩, 辛智鸣, 刘湘杰, 刘怀远 (2022). 乌兰布和沙漠梭梭(*Haloxylon Ammodendron*)夜间液流特征及其环境驱动机制. 中国沙漠, 42(5), 195-203.]

Liu ZB, Yu SP, Xu LH, Wang YH, Yu PT, Chao Y (2023). Differentiated responses of daytime and nighttime sap flow to soil water deficit in a larch plantation in Northwest China. *Agricultural Water Management*, 289, 108540. DOI: 10.1016/j.agwat.2023.108540.

Lundberg S, Lee SI (2017). A unified approach to interpreting model predictions. [2023-08-01]. http://arxiv.org/abs/1705.07874.pdf.

Luo DD, Wang CK, Jin Y (2017). Plant water-regulation strategies: isohydric versus anisohydric behavior. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 1020-1032. [罗丹丹, 王传宽, 金鹰 (2017). 植物水分调节对策: 等水与非等水行为. 植物生态学报, 41, 1020-1032.]

Lyu J, He Q, Yang J, Chen Q, Cheng R, Yan M, Yamanaka N, Du S (2020). Sap flow characteristics in growing and non-growing seasons in three tree species in the semiarid Loess Plateau region of China. *Trees*, 34, 943-955.

Lyu J, Li G, Otsuki K, Yamanaka N, Wang Y, Yue M, Du S (2023). Different transpiration and growth patterns of the black locust plantation and natural oak forest on China's Loess Plateau. *Ecohydrology*, 16, 1-12.

Mastrangelo C (2012). Time series analysis and forecasting by example. *Journal of Quality Technology*, 44, 176-177.

McDonald EP, Erickson JE, Kruger EL (2002). Research note: Can decreased transpiration limit plant nitrogen acquisition in elevated CO_2? *Functional Plant Biology*, 29, 1115-1120.

Niu ML, Li HL, Li XX (2022). A CatBoost model for simulating the daily reference evapotranspiration in greenhouse. *Water Saving Irrigation*, (1), 14-19. [牛曼丽, 李红岑, 李新旭 (2022). 基于CatBoost的温室日参考作物蒸发蒸腾量估算模型研究. 节水灌溉, (1), 14-19.]

Ord K (1996). Multivariate tests for time series models. *Technometrics*, 38, 187. DOI: 10.1080/00401706.1996.10484474.

Peng S, Piao S, Ciais P, Myneni RB, Chen A, Chevallier F, Dolman AJ, Janssens IA, Peñuelas J, Zhang G, Vicca S, Wan S, Wang S, Zeng H (2013). Asymmetric effects of daytime and night-time warming on Northern Hemisphere vegetation. *Nature*, 501, 88-92.

Phillips NG, Lewis JD, Logan BA, Tissue DT (2010). Inter- and intra-specific variation in nocturnal water transport in *Eucalyptus*. *Tree Physiology*, 30, 586-596.

Shen MG, Wang SP, Jiang N, Sun JP, Cao RY, Ling XF, Fang B, Zhang L, Zhang LH, Xu XY, Lv WW, Li BL, Sun QL, Meng FD, Jiang YH, et al. (2022). Plant phenology changes and drivers on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 633-651.

Siddiq Z, Cao KF (2018). Nocturnal transpiration in 18 broadleaf timber species under a tropical seasonal climate. *Forest Ecology and Management*, 418, 47-54.

Stuerz S, Vu DH, Asch F (2020). Nutrient uptake and assimilation under varying day and night root zone temperatures in lowland rice. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 183, 602-614.

Su Y, Wang XY, Sun YQ, Wu HL (2022). Sap flow velocity in *Fraxinus pennsylvanica* in response to water stress and microclimatic variables. *Frontiers in Plant Science*, 13, 884526. DOI: 10.3389/fpls.2022.884526.

Suárez JC, Casanoves F, Bieng MAN, Melgarejo LM, Di Rienzo JA, Armas C (2021). Prediction model for sap flow in cacao trees under different radiation intensities in the western Colombian Amazon. *Scientific Reports*, 11, 10512. DOI: 10.1038/s41598-021-89876-z.

Tyree MT, Dixon MA (1986). Water stress induced cavitation and embolism in some woody plants. *Physiologia Plantrum*, 66, 397-405.

Wang H, Zhao P, Hölscher D, Wang Q, Lu P, Cai X, Zeng X (2012). Nighttime sap flow of *Acacia mangium* and its implications for nighttime transpiration and stem water storage. *Journal of Plant Ecology*, 5, 294-304.

Wang HZ, Han RL, Liang ZS, Fan HZ (2003). Effect of soil drought stress on the shoot growth and water use efficiency of *Quercus mongolica* and *Acer stenolobum* var. *megalophyllum*. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 23, 1377-1382. [王海珍, 韩蕊莲, 梁宗锁, 樊鸿章 (2003). 土壤干旱对蒙古栎、大叶细裂槭幼苗生长及

DOI: 10.17521/cjpe.2023.0219

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

水分利用的影响. 西北植物学报, 23, 1377-1382.]

Wang Q, Gao JG, Zhao P, Zhu LW, Ouyang L, Ni GY, Zhao XH (2018). Biotic- and abiotic-driven variations of the night-time sap flux of three co-occurring tree species in a low subtropical secondary broadleaf forest. *AoB PLANTS*, 10, ply025. DOI: 10.1093/aobpla/ply025.

Wu J, Liu H, Zhu J, Gong L, Xu L, Jin G, Li J, Hauer R, Xu C (2020). Nocturnal sap flow is mainly caused by stem refilling rather than nocturnal transpiration for *Acer truncatum* in urban environment. *Urban Forestry & Urban Greening*, 56, 126800. DOI: 10.1016/j.u fug.2020.126800.

Yan CH, Wang B, Zou ZD, Yu LY, Huang WB, Qiu GY (2020). Characteristics of nighttime sap flow and its partition in a mixed forest in Jiuzhaigou valley. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 56, 732-738. [鄢春华, 王蓓, 邹振东, 余雷雨, 黄婉彬, 邱国玉 (2020). 九寨沟针阔混交林的夜间液流及其分配特征研究. 北京大学学报, 56, 732-738.]

Yan M, Zhang J, He Q, Shi W, Otsuki K, Yamanaka N, Du S (2016). Sapflow-based stand transpiration in a semiarid natural oak forest on China's Loess Plateau. *Forests*, 7, 227. DOI: 10.3390/f7100227.

Yan M, Yamanaka N, Yamamoto F, Du S (2010). Responses of leaf gas exchange, water relations, and water consumption in seedlings of four semiarid tree species to soil drying. *Acta Physiologiae Plantarum*, 32, 183-189.

You HZ, Wang C, Zhao GZ, Li DM (2023). Distribution characteristics of *Populus euramericana* nocturnal sap flow and its response to environmental factors in North China Plain. *Ecology and Environmental Sciences*, 32, 256-263. [尤海舟, 王超, 赵广智, 李冬梅 (2023). 华北平原欧美107杨单株夜间液流分配特征及其环境响应. 生态环境学报, 32, 256-263.]

Yu T, Feng Q, Si J, Mitchell PJ, Forster MA, Zhang X, Zhao C (2018). Depressed hydraulic redistribution of roots more by stem refilling than by nocturnal transpiration for *Populus euphratica* Oliv. *in situ* measurement. *Ecology and Evolution*, 8, 2607-2616.

Yu T, Feng Q, Si J, Zhang X, Alec D, Zhao C (2016). Evidences and magnitude of nighttime transpiration derived from *Populus euphratica* in the extreme arid region of China. *Journal of Plant Biology*, 59, 648-657.

Zeppel M, Tissue D, Taylor D, Macinnis-Ng C, Eamus D (2010). Rates of nocturnal transpiration in two evergreen temperate woodland species with differing water-use strategies. *Tree Physiology*, 30, 988-1000.

Zeppel MJB, Lewis JD, Chaszar B, Smith RA, Medlyn BE, Huxman TE, Tissue DT (2012). Nocturnal stomatal conductance responses to rising [CO_2], temperature and drought. *New Phytologist*, 193, 929-938.

Zhang J, Cai YM, Chen LX, Chen ZSN, Zhang ZQ (2019). Influencing factors and characteristics of nighttime sap flow of *Acer truncatum* in Beijing mountainous area. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 3210-3223. [张婕, 蔡永茂, 陈立欣, 陈左司南, 张志强 (2019). 北京山区元宝枫夜间液流活动特征及影响因素. 生态学报, 39, 3210-3223.]

Zhang R, Bi HX, Jiao ZH, Wang N, Zhao DY, Yun HY, Huang JH (2022). Diurnal and nocturnal changes in stem sap flow of *Robinia pseudoacacia* during growing season and its response to meteorological factors. *Journal of Zhejiang A&F University*, 39, 1238-1246. [张荣, 毕华兴, 焦振寰, 王宁, 赵丹阳, 云慧雅, 黄靖涵 (2022). 生长季刺槐树干液流昼夜变化特征及其对气象因子的响应. 浙江农林大学学报, 39, 1238-1246.]

Zhang YW, Wang ZX, Sun ZH, Huang JP (2022). Recognition of dominant factors behind sap flow of *Larix olgensis* based on random forest method. *Journal of Temperate Forestry Research*, 5(3), 21-28. [张延文, 王子瑄, 孙志虎, 黄建平 (2022). 基于随机森林的长白落叶松树干液流影响因素研究. 温带林业研究, 5(3), 21-28.]

Zhao C, Si J, Feng Q, Yu T, Li P, Forster MA (2019). Nighttime transpiration of *Populus euphratica* during different phenophases. *Journal of Forestry Research*, 30, 435-444.

Zhao FF, Ma X, Di N, Wang Y, Liu Y, Li GD, Jia LM, Xi BY (2020). Azimuthal variation in nighttime sap flow and its mainly influence factors of *Populus tomentosa*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 864-874. [赵飞飞, 马煦, 邸楠, 王烨, 刘洋, 李广德, 贾黎明, 席本野 (2020). 毛白杨茎干不同方位夜间液流变化规律及其主要影响因子. 植物生态学报, 44, 864-874.]

Zhao WL, Qiu GY, Xiong YJ, Zou ZD, Yan CH, Yu LY, Hao MY (2021). Simulation of sub-daily transpiration characteristics of typical arbor trees in cities based on deep neural network. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 57, 322-332. [赵文利, 邱国玉, 熊育久, 邹振东, 鄢春华, 余雷雨, 郝梦宇 (2021). 基于深度神经网络的城市典型乔木日内蒸腾特征模拟研究. 北京大学学报, 57, 322-332.]

Zhao XW, Zhao P, Zhu LW, Zhao XH (2016). Applying time series models to estimate time lags between sap flux and micro-meteorological factors. *Écoscience*, 23, 13-27.

Zhao XW, Zhao P, Zhu LW (2022). Differentiating refilling and transpiration from night-time sap flux based on time series modelling. *Trees*, 36, 16211632. DOI: 10.1007/s00468-022-02316-x.

责任编委: 叶 清 责任编辑: 李 敏

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology